

РАЗРАБОТКА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО И КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БАЗИСА МИКРОСХЕМ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.К. Зольников¹, В.И. Анциферова¹, А.Е. Козюков², Г.А. Протопопов²,
И.И. Струков¹, К.А. Чубур¹, И.В. Журавлева³

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

²АО «Научно-исследовательский институт космического приборостроения»
(г. Москва)

³Филиал Ростовского государственного университета путей сообщения
в г. Воронеж

В статье рассматривается развитие адаптивных систем связи и управления космического и гражданского назначения для обеспечения надежности функционирования и повышения точности управления. Для обеспечения устойчивости КМОП БИС к ионизирующему облучению используются способы реализации блока изоляции, конструкции и технологии рабочих транзисторов, обеспечивающих высокую стабильность их характеристик.

Ключевые слова: КМОП БИС, система связи и управления, радиационная стойкость, устойчивость, схемотехнический базис.

DEVELOPMENT OF A CIRCUITRY AND CONSTRUCTIVE-TECHNOLOGICAL BASIS FOR COSMIC CHIPS

V.K. Zolnikov¹, V.I. Antsiferova¹, A.E. Kozyukov², G.A. Protopopov², I.I. Strukov¹,
K.A. Chubur¹, I.V. Zhuravleva³

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

²Research Institute of Space Device Engineering

³Branch of the Rostov State University of Railways in the city of Voronezh

The article considers the development of adaptive communication and control systems for space and civil purposes to ensure the reliability of operation and increase the accuracy of control. To ensure the resistance of CMOS BIS to ionizing radiation, methods of implementing the isolation

unit, the design and technology of working transistors that ensure high stability of their characteristics are used.

Keywords: CMOS BIS, communication and control system, radiation resistance, stability, circuit basis.

Совершенствование технологического процесса оказывает значительно более сильное влияние на стойкость ИС к ИИ КП в области ДЭ, чем схемные решения [1-7]. Особенно это справедливо с учетом современных тенденций развития СБИС-техники в направлении дальнейшего повышения плотности упаковки с помощью масштабной миниатюризации элементов ИС [8-12]. Масштабная миниатюризация, в конечном счете, требует снижения напряжений питания ИС. Уменьшение логических перепадов напряжения и величин зарядов, представляющих хранимую информацию, приводит к уменьшению запасов помехоустойчивости схем. Снижение запасов помехоустойчивости требует более жесткого контроля изменения пороговых напряжений, обусловленных ИИ, для обеспечения правильной работы ИС. Уменьшенные логические уровни и изменения характеристик приборов под действием излучения ограничивают гибкость при проектировании ИС.

Обычно, оказывается чрезвычайно трудно обеспечить радиационную стойкость только схемотехническими методами, если для изготовления схем используется техника, не обладающая сама по себе достаточной радиационной стойкостью. Схемотехнические методы повышения радиационной стойкости основаны на выявлении и исключении (или замене) подсхем и (или) сигнальных цепей, наиболее подверженных отказам под действием полной дозы излучения (ионизации) (TID). Цель схемотехнических методов повышения радиационной стойкости – это изготовление таких ИС, в которых все чувствительные к излучению участки выходят из строя при одинаковой (предположительно достаточно высокой) полной дозе излучения.

Но, как бы остроумно ни была спроектирована схема, она все равно не будет работать, если нарушается изоляция между отдельными приборами из-за утечек в областях под защитным оксидом. Некоторые особенности методов проектирования схем, стойких к полной дозе излучения, относятся к топологическим решениям, которые нужны для сохранения целостности межприборной изоляции, а не к собственно схемным решениям. Особенно чувствительны к воздействию полной дозы излучения паразитные МОПТ, образующиеся там,

где шины питания и сигнальные линии проложены над областями толстого защитного оксида.

Исходные пороговые напряжения таких структур до облучения могут быть достаточно высокими, однако, и сами сдвиги пороговых напряжений увеличиваются с ростом толщины оксидного слоя и действующего электрического поля. По этой причине, областям под толстым оксидом свойственны намного большие сдвиги пороговых напряжений при воздействии излучения, нежели «правильным» МОПТ со значительно более тонкими подзатворными оксидами. Во многих случаях оказывается, что уровень суммарной дозы излучения, при котором происходит отказ схемы, определяется именно паразитными транзисторами под толстым защитным оксидом. При использовании технологий с защитным оксидом, не обладающим повышенной радиационной стойкостью, необходимо:

- либо применять базовые топологические проектные нормы, определяющие минимальную ширину области защитного оксида (длину паразитного канала) и минимальный промежуток между соединительными проводниками и каналом прибора;

- либо делать охранные кольца (технологические методы).

В некоторых технологиях с невысокой радиационной стойкостью дополнительно предусматривается, также, напряжение смещения подложки (которое подают на подложку паразитных МОПТ под защитным окислом дополнительное смещение, запирающее их). Но все же, топологические проектные нормы не позволяют достаточно надежно ликвидировать все возможные места паразитных утечек. На стадии проектирования ИС идентифицировать цепи утечки достаточно трудно, особенно в связи с тем, что они могут возникать только в тех ИС, в которых есть небольшие несовмещения фотошаблонов разных слоев ИС, возникшие в процессе их изготовления. Цена невыявленной цепи утечки, которая вызывает преждевременный отказ ИС, может выражаться в затратах на переработку конструкции и повторное изготовление ИС. Для решения проблем утечек, индуцированных излучением, разработаны технологические процессы изготовления защитных оксидных слоев с повышенной радиационной стойкостью, для которых получены впечатляющие результаты повышения стойкости к излучению [2]. Эти технологические процессы позволили заметно ослабить проектные нормы на промежутки между отдельными приборами и тем самым повысить плотность упаковки ИС.

Необратимые эффекты воздействия ИИ КП в части ДЭ на характеристики МОПТ включают в себя сдвиги пороговых напряжений, снижение крутизны приборов, увеличение утечек переходов и поверхностных утечек, которые ухудшают характеристики приборов в предпороговой области. И, в этом случае, влияние излучения на оксид зависит от его толщины и от величины электрического поля, действующего в оксиде во время облучения [3, 4]. Положительное электрическое поле между затвором и кремнием приводит к тому, что большая часть генерируемых излучением дырок захватывается на ловушки, находящиеся вблизи границы оксид-кремний, где эти дырки сильнее изменяют характеристики приборов. Когда же преобладает захват на ловушки на граничных состояниях, пороговые напряжения *n*-канальных МОПТ после воздействия излучения могут стать более положительными, чем до его воздействия. Этот эффект называется перескоком (или свержвосстановлением) [5, 6].

На рисунке 1 показаны зависимости передаточных характеристик прибора от полной поглощенной дозы излучения (при неизменной мощности дозы) для *n*-канального и *p*-канального МОПТ.

Значения сдвигов порогового напряжения и уменьшения подвижности под действием конкретной дозы излучения меняются от прибора к прибору, в зависимости от его размеров, типа проводимости канала, значений амплитуды и частоты сигнала на затворе во время облучения. Подробное исследование влияния полной дозы излучения на отдельные приборы, типичные для конкретной технологии, чрезвычайно важно для проектирования радиационно-стойких ИС (РСИС).

Стойкость конкретной схемы к ИИ КП в области ДЭ зависит не только от реакции на облучение отдельных приборов, из которых состоит эта схема, но, что наиболее важно, от взаимодействия этих приборов при реализации данной схемной функции с конкретными требованиями к быстродействию и мощности потребления. Разработчик РСИС концентрирует свое внимание именно на этих взаимодействиях приборов. Если необходимо добиться максимального быстродействия схемы с соблюдением всех проектных ограничений, то, перед началом проектирования, нужно полностью исследовать радиационные характеристики предполагаемых схемных решений с помощью машинного моделирования. Важнейшими входными данными, при таком моделировании, являются зависимости характеристик приборов, подвергнутых воздействию излучения, от действующих во время облучения напряжений смещения и сигналов.

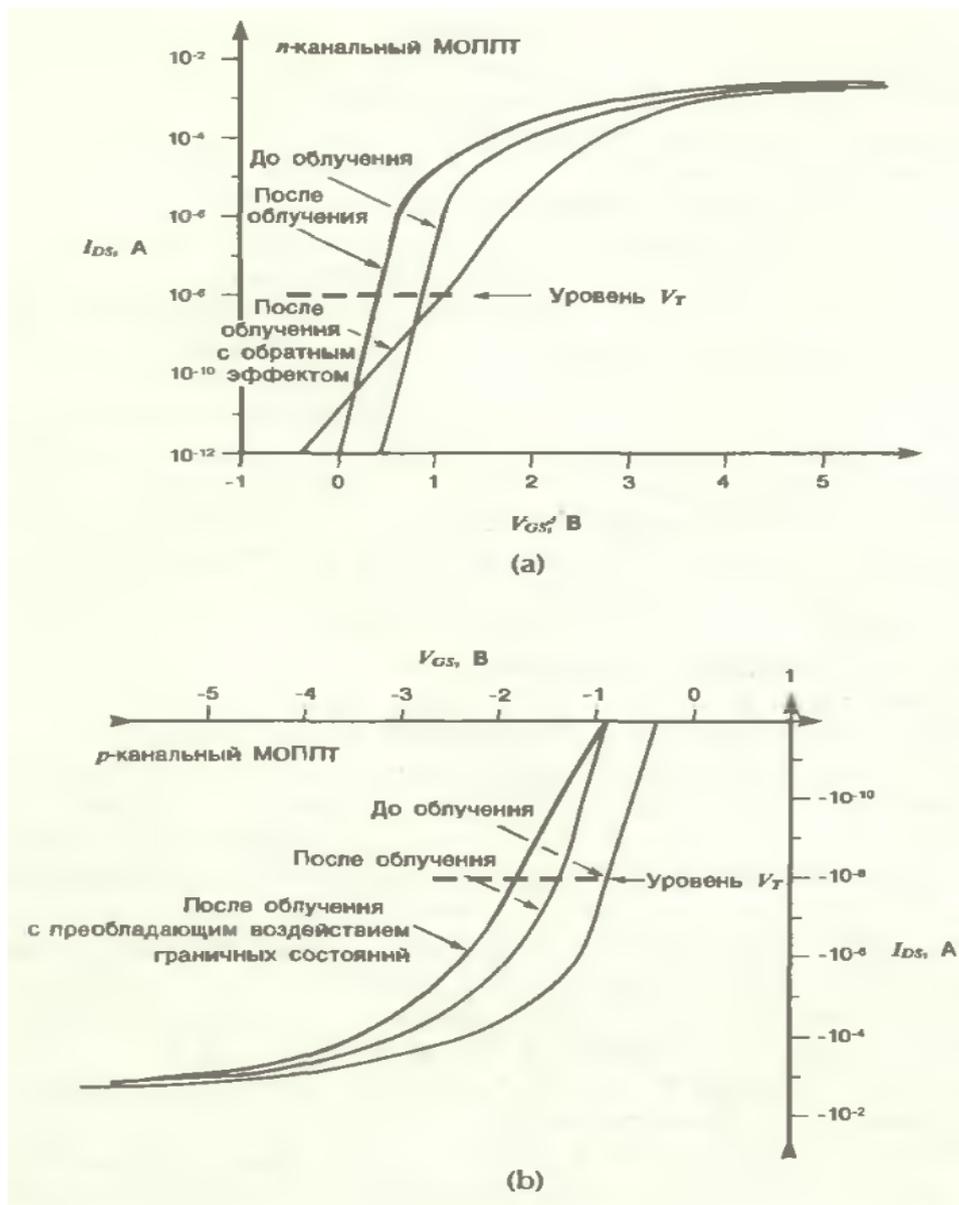


Рисунок 1 – Передаточные характеристики МОПТ до и после воздействия полной дозы излучения: а) *n*-канальный транзистор; б) *p*-канальный транзистор

Наглядный пример видов анализа, играющих важную роль при проектировании РСИС, дают характеристики простого двухтранзисторного КМОП-инвертора, подвергнутого воздействию излучения. Изменения характеристик схемы под действием излучения вызывают искажения сигнала и, следовательно, снижение функциональной надежности схемы. Мера стойкости схемы по отношению к искажениям сигнала определяется ее запасами помехоустойчивости. Статическая передаточная характеристика $V_{out} = f(V_{in})$ логического вентиля дает информацию, относящуюся к его логическим уровням и запасам помехоустойчивости. На рисунке 2 показаны статические передаточные характеристики инверторной КМОП-схемы.

Здесь V_0 – уровень логического «0», V_1 – уровень логической «1». Разность $(V_1 - V_0)$ представляет собой логический перепад напряжений. Входные и выходные уровни цифровой двоичной схемы совместимы между собой, то есть напряжения V_1 и V_0 одинаковы для входа и выхода схемы. На рисунке 2 пунктиром показана обращенная характеристика $V_{out} = f(V_{in})$ с заменой оси V_{out} на ось V_{in} и наоборот, с помощью которой определяются уровни V_0 и V_1 .

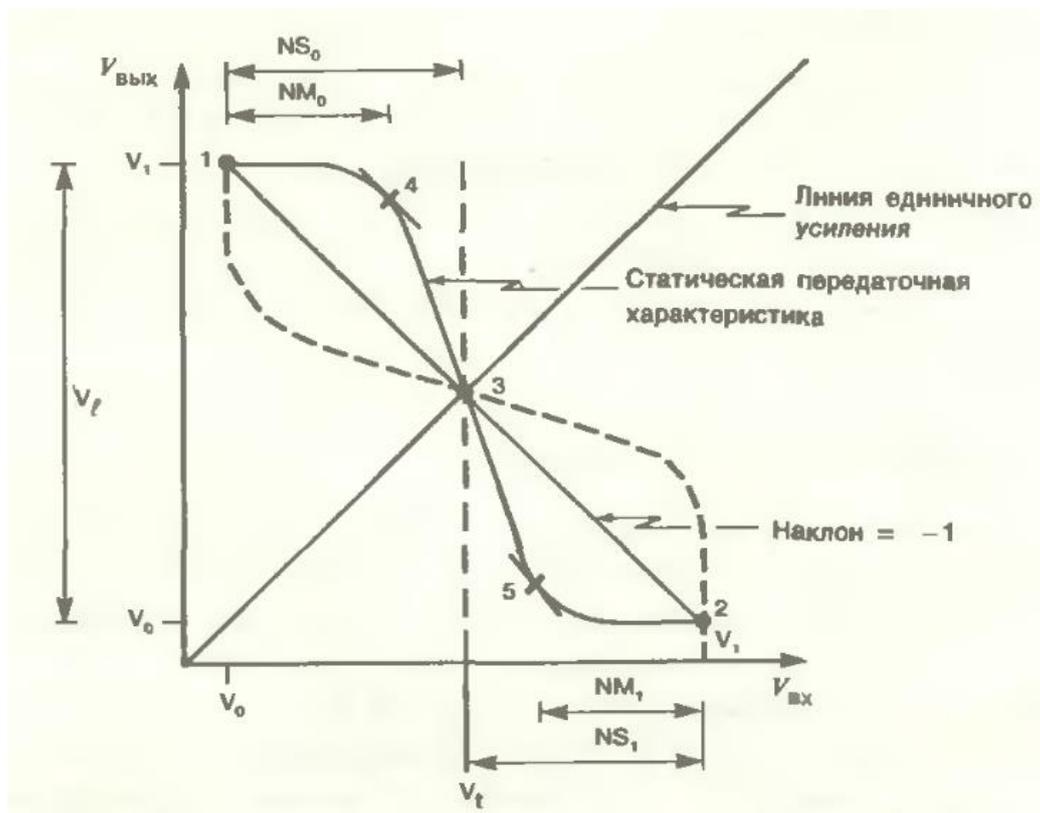


Рисунок 2 – Статические передаточные характеристики схемы КМОП-инвертора

Эти две передаточные характеристики пересекаются в точках 1 и 2, определяя V_0 и V_1 , а также в опорной точке 3. Между точками 1 и 2 можно провести прямую линию с наклоном -1 , которая пересекает передаточную характеристику в точке 3, определяя порог переключения логического состояния V_t . В данном примере предполагается, что инвертор выполняется на транзисторах с симметричными токами, так что, порог логического переключения V_t равен $0,5 \cdot V_{dd}$. Инвертор работает на емкостную нагрузку (на вентили следующих каскадов), так что, падение напряжения на каждом из транзисторов в статическом режиме пренебрежимо мало и, поэтому, $V_1 = V_{dd}$ и $V_0 = 0$. Точки 4 и 5 представляют собой точки единичного усиления, в которых наклон касательной равен « -1 ». Этими точками с двух сторон ограничена переходная область с высоким усилением. Именно в этой переходной области логический вентиль потребляет

мощность от источника питания. Запасы помехоустойчивости такого инвертора можно определить как такие изменения входного напряжения, при которых выходное напряжение отклоняется от рабочей точки до ближайшей точки единичного усиления. Отрезки NM_1 и NM_0 представляют собой запасы помехоустойчивости, соответственно, по уровням логической «1» и логического «0». Величины чувствительности к помехам определяются как изменения входного напряжения, при которых выходное напряжение отклоняется от рабочей точки до порога логического переключения. Эти величины определяются отрезками NS_1 и NS_0 , соответственно для уровней логической «1» и логического «0».

На рисунке 3 показано влияние заряда в оксиде и на поверхностных состояниях, образующегося под действием излучения, на передаточные характеристики инвертора. Величина воздействия полной дозы излучения на оксидные слои в приборе зависит от затворных напряжений, действовавших во время облучения. Для случая воздействия излучения в течение длительных промежутков времени при небольшой мощности дозы, типичной для космических условий, вполне приемлемо допущение о 50 %-ной скважности входного сигнала. Таким образом, как n -канальные, так и p -канальные МОПТ, в среднем, находятся во включенном и выключенном состояниях одинаковое время. Асимметрия измеренных уровней радиационных повреждений в приборах разных типов проводимости связана с разными направлениями электрического поля в их оксидах, например, излучение, в данном случае, оказывает на n -канальные транзисторы более сильное воздействие.

Отрицательный сдвиг пороговых напряжений уменьшает NM_0 и одновременно увеличивает NM_1 , что видно по положению точек единичного усиления 8 и 9.

Эти сдвиги пороговых напряжений вызывают, также, смещение порогов логического переключения из исходного состояния до облучения $V_{dd}/2$ в точки 6 и 7. В результате, NS_1 увеличивается, однако, за счет уменьшения NS_0 , что свидетельствует о намного более высокой чувствительности инвертора к воздействиям помех (например, к излучению), способных вызвать логический сбой. Эффекты обратного воздействия в n -канальных транзисторах будут вызывать искусственное увеличение NM_0 без реального повышения NS_0 . Сдвиги пороговых напряжений усугубляются ростом захвата носителей на граничные состояния, что вызывает расширение переходной области характеристики (между точками 8 и 9), показанное на рисунке 3.

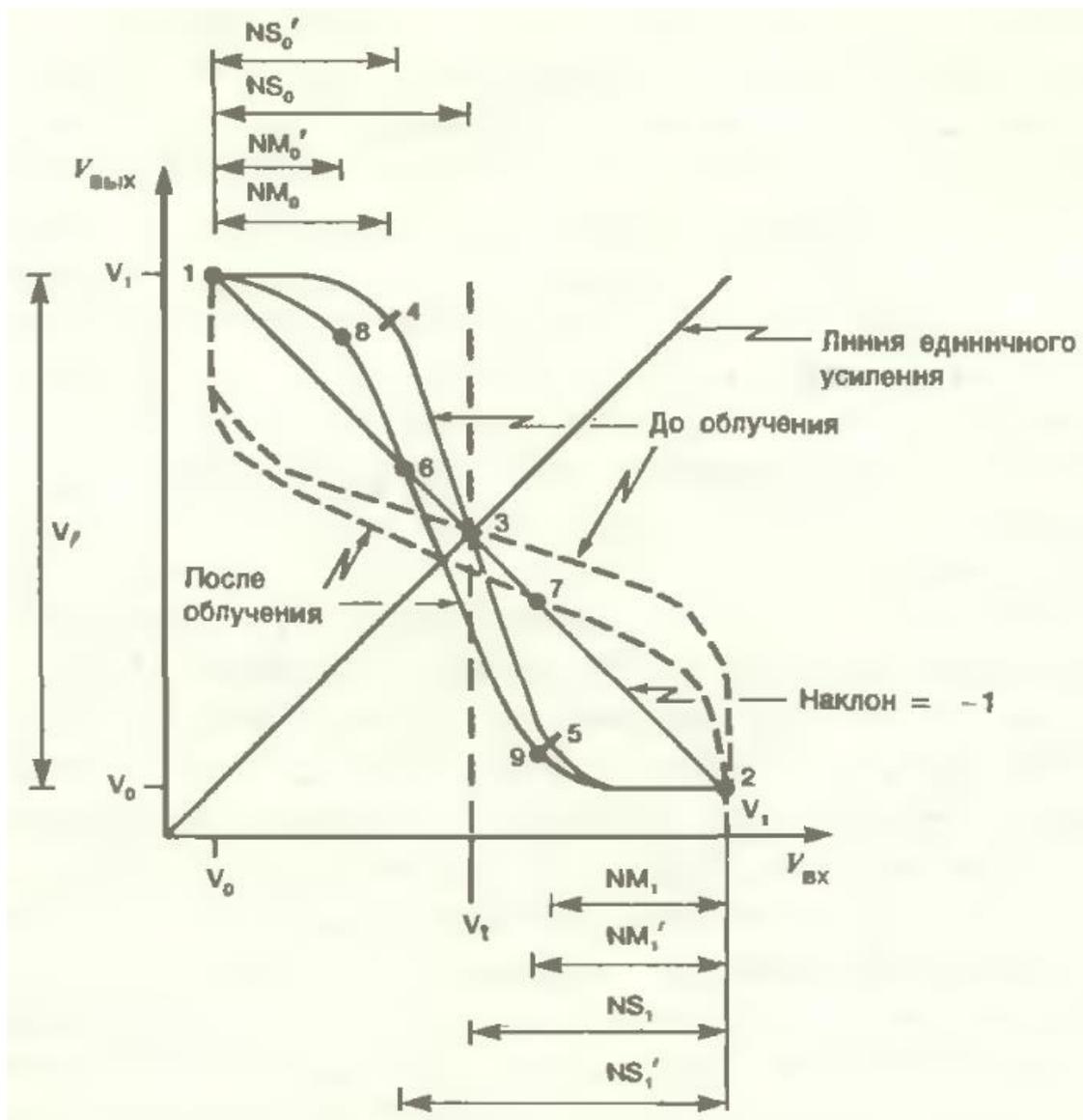


Рисунок 3 – Влияние воздействия ИИ КП в части ДЭ на статические передаточные характеристики схемы КМОП-инвертора

Поэтому, теперь инвертор при переключении рассеивает больше мощности. Смещение этих порогов переключения оказывает сильное влияние на динамические (переключательные) характеристики инвертора.

Список литературы

1. Анашин, В.С. Проблемы моделирования воздействия ионизирующего излучения на радиоэлектронную аппаратуру с использованием специализированного программного обеспечения / В.С Анашин., И.О. Ишутин, Г.А. Протопопов // Высокие технологии, исследования, промышленность : сб. трудов Девятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – СПб., 2010.

2. Выбор значений параметров, определяющих кинетику накопления заряда в диэлектрике при радиационном воздействии / В. К. Зольников, В. П. Крюков, В. Н. Ачкасов, В. А. Складар // Моделирование систем и процессов. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 24-26.

3. Меерсон, В.Э. Общая характеристика моделей заряженных частиц космического пространства / В.Э. Меерсон, Г.В. Киселёв // Моделирование систем и процессов. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 40-43.

4. Создание базиса для микросхем сбора и обработки данных / В.А. Складар, А.В. Ачкасов, К.В. Зольников, И.И. Струков, К.А. Чубур // Моделирование систем и процессов. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 66-71.

5. Анализ качества проектирования блоков ОЗУ в составе микропроцессорных систем с обеспечением минимальной сбоеустойчивости / В.К. Зольников, Ю.А. Чевычелов, В.В. Лавлинский, А.В. Ачкасов, А.В. Толкачев, О.В. Оксюта // Моделирование систем и процессов. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 47-55.

6. Анализ проектирования блоков RISC-процессора с учетом сбоеустойчивости / В.К. Зольников, А.С. Ягодкин, В.И. Анциферова, С.А. Евдокимова, Т.В. Скворцова, А.И. Яньков // Моделирование систем и процессов. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 56-65.

7. Определение структур в микросхемах, чувствительных к воздействию космических частиц / А.Л. Савченко, А.Ю. Кулай, И.И. Струков, К.А. Чубур, С.В. Гречаный // Моделирование систем и процессов. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 73-77.

8. Юров, А.Н. Разработка автономных программных решений на основе геометрических ядер по созданию цифровых сборочных моделей станочных приспособлений / А.Н. Юров, В.И. Анциферова // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 3. – С. 86-93.

9. Жуков, В.М. Методология синтеза информационно-измерительной и управляющей системы с настраиваемой структурой и гибкими чувствительными элементами на примере фазированной антенной решетки / В.М. Жуков, Д.Ю. Муромцев, В.В. Лавлинский // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 9-18.

10. Методы контроля надежности при разработке микросхем / К.В. Зольников, С.А. Евдокимова, Т.В. Скворцова, А.Е. Гриднев // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 1. – С. 39-45.

11. Определение мероприятий по программе обеспечения качества работ проектирования и серийного производства микросхем и оценки их эффектив-

ности на примере СБИС 1867ВН016 / К.В. Зольников, А.С. Ягодкин, С.А. Евдокимова, Т.В. Скворцова // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 1. – С. 46-53.

12. Разработка проектной среды и оценка технологичности производства микросхемы с учетом стойкости к специальным факторам на примере СБИС 1867Ц6Ф / В.А. Складар, В.А. Смерек, К.В. Зольников, Д.Н. Чернов, А.С. Ягодкин // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 1. – С. 77-82.

13. Макаренко, Ф.В. Сужение спектра излучения GaAs светодиода за счет применения светофильтра InP (Ag) / Ф.В. Макаренко, А.В. Арсентьев, К.В. Зольников // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 32-38.

14. Юров, А.Н. Организация технических условий и информационных данных в 3D моделях программных систем / А.Н. Юров, В.В. Сокольников, К.С. Меремьянин // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 83-89.